

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
 Отделение материаловедения

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Филаментация лазерного излучения в кристаллах селенида кадмия
УДК 621.373.826:548.0:535.21

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Костицына Дарья Альбертовна		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Олешко В.И.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОМ	Степанов С.А.	к.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код ре- зультата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Профессиональные компетенции</i>	
Р1	Применять глубокие естественнонаучные, математические, гуманитарные, общепрофессиональные знания в области оптотехники
Р2	Воспринимать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области световой, оптической и лазерной техники, оптического и светотехнического материаловедения и оптических и светотехнических технологий
Р3	Применять полученные знания для решения задач, возникающих при эксплуатации новой техники и технологий оптотехники
Р4	Владеть методами и компьютерными системами проектирования и исследования световой, оптической и лазерной техники, оптических и светотехнических материалов и технологий
Р5	Владеть методами проведения фотометрических и оптических измерений и исследований, включая применение готовых методик, технических средств и обработку полученных результатов
Р6	Владеть общими правилами и методами наладки, настройки и эксплуатации оптической, световой и лазерной техники для решения различных задач
<i>Универсальные компетенции</i>	
Р7	Проявлять творческий подход при решении конкретных научных, технологических и опытно-конструкторских задач в области оптотехники
Р8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально – экономических различий, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной деятельности
Р9	Уметь эффективно работать индивидуально и в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации
Р10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научной, педагогической и производственной деятельности
Р11	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности

Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.03.02 Опотехника
 Отделение материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Степанов С.А.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
4B71	Костицыной Дарье Альбертовне

Тема работы:

Филаментации лазерного излучения в кристаллах селенида кадмия
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Образцы полупроводниковых кристаллов – CdSe, CdTe, GaAs. Отечественная и зарубежная литература по филаментации лазерного излучения в кристаллах и двухфотонной люминесценции.- Экспериментальные установки для исследования кинетики и спектров фото- и катодолюминесценции.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке;</i>	Аналитический обзор литературы по филаментации лазерного излучения в кристаллах и двухфотонной люминесценции. Постановка задачи исследований. Освоение методик регистрации спектров и кинетики люминесценции под действием лазерных (УФ и ИК) и электронных пучков; методики регистрации филамент в кристалле CdSe. Изучение влияния плотности энергии лазерного

заключение по работе).	излучения на формирование филамент и спектры свечения полупроводниковых кристаллов. Обсуждение результатов выполненной работы, выводы по работе. Разработка дополнительных разделов: «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», «Социальная ответственность». Заключение по работе.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Блок-схема экспериментальной установки. 2. Экспериментальные результаты (графики, таблицы, осциллограммы, фотографии).
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Доцент ОСГН Маланина В.А.
Социальная ответственность	Ассистент Черемискина М.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.2020 г.
--	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Олешко В.И.	д.ф-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Костицына Дарья Альбертовна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
4B71	Костицыной Дарье Альбертовне

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение школы (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 2287932 руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 94 345 руб., затраты на амортизацию оборудования: 2154000 руб.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Внебюджетные отчисления – 28 492 руб., размер страховых взносов составляет 30,2 %.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Определение потенциальных потребителей, оценка целесообразности исследования (технология QuaD), SWOT-анализ
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Определение материальных затрат, затрат на спецоборудование, расчет заработной платы исполнителей, внебюджетных отчислений, накладных налогов и составление сметы затрат НИ
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Выводы по всей работе, оценка ресурсопотребления, целесообразности и социальной эффективности проекта

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Матрица SWOT
2. График проведения и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Маланина В.А.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4B71	Костицына Дарья Альбертовна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4B71	Костицыной Дарье Альбертовне

Школа	Инженерная школа новых производственных технологий	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	12.03.02 «Оптотехника»

Тема ВКР:

Филаментация лазерного излучения в кристаллах селенида кадмия

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p>Объект исследования: образцы полупроводниковых кристаллов CdSe, CdTe, GaAs.</p> <p>Область применения: лазерные технологии, электроника, люминесцентный контроль качества и др.</p>
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>ГОСТ 22269-76 Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места;</p> <p>ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования;</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования;</p> <p>Трудовой кодекс РФ</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>Вредные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения; – повышение уровней шума; – повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны; – повышенная температура воздуха рабочей зоны; – повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений; <p>Опасные факторы:</p> <ul style="list-style-type: none"> – прямое, зеркально или диффузно отраженное лазерное излучение; – опасность поражения электрическим током вследствие повышенного напряжения в источниках электропитания лазеров.

3. Экологическая безопасность:	Атмосфера: электромагнитное, механическое, шумовое загрязнение. Гидросфера: попадание механических примесей, соединений. Литосфера: загрязнение тяжелыми металлами или их производными.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: короткое замыкание электрической цепи, возгорание лазерного оборудования, обрушение конструкции здания, терроризм, пандемия. Наиболее типичная ЧС: возгорание лазерного оборудования.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина Мария Сергеевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4В71	Костицына Дарья Альбертовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 80 с., 25 рис., 21 табл., 52 источника.

Ключевые слова: полупроводниковые кристаллы, филаментация, двухфотонная люминесценция, катодолюминесценция, спектрально-кинетические характеристики.

Объектом исследования являются образцы полупроводниковых кристаллов CdSe, CdTe, GaAs.

Цель работы – изучение закономерностей и особенностей филаментации лазерного излучения в кристалле селенида кадмия с помощью двухфотонной люминесценции.

В процессе исследования проводились сбор и обработка литературных данных о самофокусировке и филаментации лазерного излучения в конденсированных средах и атмосферном воздухе. Измерены спектры люминесценции полупроводниковых кристаллов при двухфотонном возбуждении. Проведено их сравнение с соответствующими спектрами, полученными при однофотонном ультрафиолетовом и электронно-пучковом возбуждении. Проведена экономическая оценка исследования, определены опасные и вредные факторы работы и мероприятия по защите от них.

В результате исследования зарегистрировано явление филаментации и двухфотонной люминесценции в кристаллах селенида кадмия.

Степень внедрения: результаты работы внедрены в лаборатории импульсной оптической спектроскопии отделения материаловедения.

Область применения: диагностика объемных свойств полупроводниковых кристаллов, лазерные технологии.

В будущем планируется изучение возможности генерации вынужденного излучения полупроводников при двухфотонном возбуждении.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

ДВЛ – двухфотонно возбуждаемая люминесценция

ИК – инфракрасное

ИКЛ – импульсная катодолюминесценция

ИКТ – измеритель калориметрический твердотельный

ИСУЭ - импульсный сильноточный ускоритель электронов

ИФЛ – импульсная фотолюминесценция

ЛИ – лазерное излучение

ОВЛ – однофотонно возбуждаемая люминесценция

ПЛП – приповерхностная лазерная плазма

СЭП – сильноточный электронный пучок

УФ – ультрафиолетовое

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель

ЦО – центры окраски

Оглавление

Введение.....	12
1. Обзор литературы.....	13
1.1. Получение, оптические свойства и применение полупроводниковых кристаллов группы $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$	13
1.2. Люминесценция полупроводниковых кристаллов CdSe.....	15
1.3. Двухфотонное поглощение в монокристаллах GaAs	18
1.4. Самофокусировка лазерного излучения в газах и твердых телах.....	19
1.5. Регистрация филамент в воздухе.....	20
1.6. Филаментация лазерного излучения в стекле	22
1.7. Филаментация и самофокусировка света в кристаллах LiF.....	24
1.8. Основные выводы из литературного обзора.....	27
1.9. Постановка цели и задачи исследований.....	28
2. Объекты и методы исследования.....	30
2.1. Объекты исследований.....	30
2.2. Лазерный стенд для исследования филаментации и двухфотонно возбуждаемой люминесценции полупроводниковых кристаллов.....	30
2.3. Импульсный спектрометр для измерения спектрально-кинетических характеристик катодо- и однофотонной люминесценции кристаллов.....	32
3. Результаты проведенного исследования.....	35
3.1. Филаментация первой гармоники неодимового лазера в кристаллах CdSe.....	35
3.2. Двухфотонно возбуждаемая люминесценция в полупроводниковых кристаллах CdSe, CdTe, GaAs.....	38
3.3. Влияние плотности энергии лазерного излучения на спектры свечения кристалла CdSe.....	39
3.4. Кинетика двухфотонно возбуждаемой люминесценции кристаллов CdSe.....	41

3.5. Спектральные и кинетические характеристики однофотонно воз- буждаемой люминесценции кристаллов CdSe.....	43
3.6. Импульсная катодолюминесценция полупроводниковых кристаллов CdSe.....	44
3.7. Сравнение спектров люминесценции CdSe при различных способах возбуждения.....	45
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбереже- ние.....	49
5. Социальная ответственность.....	62
Заключение.....	74
Список использованных источников.....	75

Введение

Исследование люминесценции полупроводниковых кристаллов, при возбуждении мощными электронными и лазерными импульсами представляет интерес для различных научных и прикладных направлений:

- люминесцентного контроля качества кристаллов;
- радиационной физики твердого тела;
- изучения филаментации и самофокусировки мощных лазерных и электронных пучков в конденсированных средах;

Несмотря на то, что за последние два десятилетия были проведены обширные исследования филаментации лазерного излучения, все же есть ряд аспектов, которые остаются непонятыми из-за сложности явления. Необходимость проведения исследований связана с общенаучным интересом к двум проблемам – изучением поведения твердых тел при высоких плотностях энергии и получением новых данных о физической природе явления филаментации лазерного излучения в конденсированных средах.

В связи с этим была поставлена цель изучить спектры люминесценции полупроводникового кристалла CdSe при двухфотонном возбуждении в условиях филаментации возбуждающего лазерного излучения и их сравнение со спектрами, полученными при однофотонном ультрафиолетовом и электронно-пучковом возбуждении. Данные кристаллы относятся к группе $A^{II}B^{VI}$ полупроводниковых соединений и были выбраны ввиду значения их ширины запрещенной зоны. Лазерное возбуждение исследуемых кристаллов дает возможность получения спектров ДВЛ, что представляет практический интерес для люминесцентной диагностики объемных свойств полупроводниковых кристаллов.

1. Обзор литературы

1.1. Получение, оптические свойства и применение полупроводниковых кристаллов группы $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$

Основным параметром, по которому полупроводниковые соединения классифицируются на группы, является величина запрещенной зоны полупроводника. Чем больше значение данного параметра, тем выше значение предельно допустимой рабочей температуры приборов, создаваемых на основе соответствующих материалов, и тем больше сдвиг в коротковолновую область спектра рабочего диапазона приборов [1]. В таблице 1 приведены различные типы материалов по группам и их характеристики.

Таблица 1 – Перспективные материалы для элементной базы оптоэлектроники [2]

Параметр материала				Легирующая примесь	
Группа материала	Химическая формула	Ширина запрещенной зоны, эВ	Показатель преломления	<i>n</i> -типа	<i>p</i> -типа
$A^{III}B^V$	GaP	2,25	3,3	Se, Te	Cd, Zn
	GaAs	1,43	3,6	Se, Te	Cd, Zn
	GaN	3,25	2,1...2,4	Se, Te	Cd, Zn
	InN	2,4	2,9	Se, Te	Cd, Zn
	AlN	3,8	2,0	Se, Te	Cd, Zn
	AlP	2,45	-	Se, Te	Cd, Zn
	$Ga_{1-x}In_xP$	1,35...2,25	2,9...3,3	Se, Te	Cd, Zn
	$Ga_{1-x}As_xP$	1,43...2,25	3,3...3,6	Se, Te	Cd, Zn
	$AlAs_{1-x}P_x$	2,16...2,45	-	Se, Te	Cd, Zn
	$Al_{1-x}In_xP$	1,30...2,45	-	Se, Te	Cd, Zn
	$Ga_{1-x}Al_xP$	2,25...2,45	-	Se, Te	Cd, Zn
	GaAlN	3,25...3,8	-	Se, Te	Cd, Zn
	$Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$	0,36...2,25	2,9...3,3	Se, Te	Cd, Zn
	$Ga_{1-x}AlAs_{1-y}P_y$	1,43...2,45	2,9...3,2	Se, Te	Cd, Zn
	$Al_{1-x}In_xAs_{1-y}P_y$	0,36...2,45	3,0...3,2	Se, Te	Cd, Zn
$A^{II}B^{VI}$	ZnS	3,8	2,4	Br, Ai, Cl	Cu, P
	CdS	2,9	2,5	Al, Br, Ga, In	Cu, P
	ZnSe	2,7	2,9	Al, Br, Ga, In	-
	CdSe	1,8	2,6	Br, Cl, I	-
	ZnTe	2,3	3,6	Cl, Al, Ga	Ag, Cu, P
	CdTe	1,6	2,8	Al, Cl, In	Sb, Li, P

Продолжение таблицы 1

	$Zn_{1-x}Cd_xS$	2,9...3,8	2,4...2,5	Al, Br, In, Ga	Cu, P
	$Zn_{1-x}Cd_xSe$	1,8...2,7	2,6...2,9	Br, Ga, In, Al	-
	$ZnSe_{1-x}S_x$	2,7...3,8	2,4...2,9	Al, Br, Cl	-
	$Cd_{1-x}Se_xS$	1,8...2,9	2,5...2,6	Al, Br, Cl	-
	$CdTe_{1-x}S_x$	1,6...2,9	2,5...2,7	In, Cl, I	Cu, P, Sb
$A^{VI}B^{VI}$	SiC	2,8...3,3	2,5...2,7	N	In, Al
Другие материалы	Si	1,1	3,5	As, P, Sp	B, Ga, Al
	CuAlS ₂	3,5	-		
	GaS	3,4	-		
	ZnSe - GaP	2,25...2,70	2,9...3,3		
	ZnS - GaP	2,25...3,80	2,4...3,3		

Из кристаллов, отмеченных в таблице 1, нами для исследований были выбраны кристаллы из группы $A^{II}B^{VI}$: CdSe, CdTe и кристалл GaAs из группы $A^{III}B^V$.

Для выращивания полупроводниковых монокристаллов обычно используют методы кристаллизации из газовой фазы, вследствие высокой упругости паров, монокристаллы обладают способностью легко сублимироваться. Для получения полупроводниковых монокристаллов из газовой фазы в большинстве случаев применяется несколько способов [3]:

- 1) прямой синтез элементарных веществ в инертной среде аргона при температуре 1000-1100°C;
- 2) сублимацией готового измельченного продукта при температуре 1100-1200° С соответствующего состава, что и в инертной атмосфере аргона [3].

Вышеперечисленными методами обычно получают монокристаллы соединений: CdSe, CdTe и др.

CdSe (селенид кадмия) - один из широкозонных полупроводниковых кристаллов группы $A^{II}B^{VI}$ с шириной запрещенной зоны ~1,8 эВ, темно-красного, почти черного цвета. После высокотемпературного отжига плёнок, нанесённых на чрезвычайно нагретые подложки, вблизи края поглощения возникают полосы, свойственные для экситонного поглощения [4]. Диапазон про-

пускания селенида кадмия составляет $0,8 - 23$ мкм. Максимум спектра экситонной люминесценции находится при $\lambda \approx 690 \pm 2$ нм.

Фоточувствительность, присущая полупроводниковым соединениям селенида кадмия позволяет применять его для изготовления фоторезисторов, чувствительных к падающему свету при длинах волн до 2 мкм. Помимо этого применяется в качестве активной среды в полупроводниковых лазерах, как материал для изготовления тонкопленочных фотопреобразователей, датчиков, солнечных батарей [4].

Второй исследуемый кристалл - CdTe (теллурид кадмия), ширина запрещенной зоны которого составляет $\sim 1,6$ эВ. Диапазон пропускания CdTe: $1 - 28$ мкм. Кристаллическая структура – кубическая. Длина волны экситонных полос в спектре люминесценции: ~ 795 нм. Используется для создания фотоприемников, солнечных батарей, детекторов ионизирующих излучений [4].

Арсенид галлия (GaAs) - полупроводниковый кристалл, ширина запрещенной зоны $\sim 1,43$ эВ. В промышленном производстве кристаллы GaAs выращивают тремя методами: метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида, метод горизонтальной направленной кристаллизации, метод вертикальной направленной кристаллизации [5]. Арсенид галлия обладает высокой подвижностью электронов, что позволяет приборам работать на сверхвысоких частотах [6]. Кристаллы арсенида галлия используются для создания быстродействующих интегральных схем и полевых транзисторов, лазерных диодов, туннельных диодов, диодов Ганна, отлично подходят для применения в солнечных батареях [7].

1.2. Люминесценция полупроводниковых кристаллов CdSe

Измерение характеристик люминесценции необходимо для контроля степени чистоты материалов, наличие примесей, дефектов, их природу и степень однородности распределения по объему, а также влияние технологических операций на изменение качества материалов [8].

Кристаллы группы $A^{II}B^{VI}$ обладают интенсивной люминесценцией и, как было отмечено ранее, применяются в качестве активной среды для полупроводниковых лазеров. При изготовлении полупроводниковых квантовых генераторов, возбуждаемых электронным пучком, часто наблюдается разброс параметров, таких как пороговые плотности тока, генерируемые мощности, эффективность излучения и т.д., что связано, прежде всего, с исходной концентрацией равновесных носителей тока, плотностью дислокаций, дефектов и центров безызлучательной рекомбинации. Авторами работы [9] был разработан метод, который позволил сравнительно просто отобрать полупроводниковые кристаллы, применение которых обеспечило оптимальные параметры полупроводниковых лазеров с электронным возбуждением. С этой целью в работе [9] была исследована зависимость между фотолюминесцентными свойствами кристаллов сульфида и селенида кадмия и спектральной зависимостью коэффициента оптического усиления при больших интенсивностях возбуждения кристаллов электронным пучком и лазерным излучением.

Излучение фотолюминесценции CdSe регистрировалось с помощью спектрографа ДФС-13 с разрешением 0,1... 0,2 нм/мм в диапазоне 670-730 нм. При изменении температуры роста кристаллов изменялись спектры фотолюминесценции.

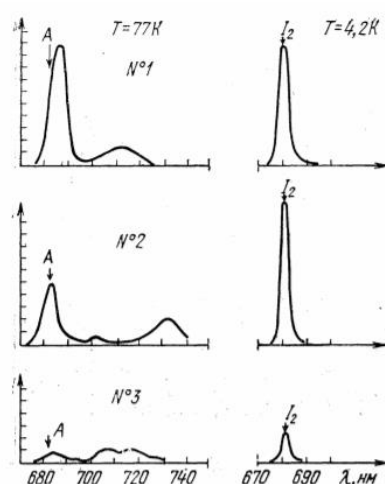


Рисунок 1 - Спектры фотолюминесценции образцов селенида кадмия, выращенных сублимацией порошка в потоке аргона при 740 °С (№1), 872 °С (№2), и 950 °С (№3) [9]

В диапазоне температуры роста от 700 до 800 °С в спектрах люминесценции при $T = 77$ К наблюдалось интенсивное излучение в экситонной области, сдвинутое по отношению излучения свободного экситона в длинноволновую область спектра на 3...4 нм.

Авторами работы [10] были исследованы люминесцентные и электрические свойства CdSe β -структуры, полученного способом твердофазного замещения. В работе показано, что в диапазоне температур 290–450 К преобладает краевая полоса излучения, причиной существования которой является аннигиляция свободных экситонов при неупругом рассеянии на свободных носителях заряда. Специфика β структуры CdSe связана с наличием эффективной краевой люминесценции. Излучение в работе [10] генерировалось азотным лазером при изменении уровня возбуждения L набором калиброванных светофильтров. Спектр фотolumинесценции селенида кадмия, исследуемый в диапазоне температур 290–450 К представлен широкой полосой (рисунок 2).

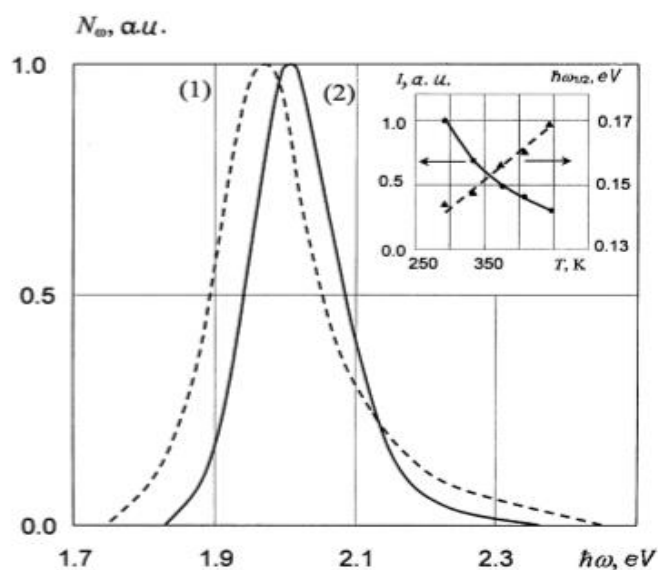


Рисунок 2 - Спектры фотolumинесценции селенида кадмия: 1 – при температуре 290 К; 2 – при температуре 450 К (N_ω - спектральная плотность фотонов, $h\omega$ - энергия фотонов). На выноске - температурные зависимости интенсивности и полуширины $h\omega_{1/2}/E$ полосы излучения [10]

Таким образом, установлена экситонная природа краевой полосы фотolumинесценции селенида кадмия β структуры при высоких температурах. По-

лученный результат имеет значение с точки зрения получения лазерного излучения в образцах селенида кадмия при высокой температуре [10].

Таким образом, из работ [9], [10] следует, что в люминесценции кристаллов CdSe существенную роль играют приповерхностные состояния. В спектре наблюдается два максимума интенсивности в области 2,16 эВ (~574 нм) и 1,52 эВ (~815,8 нм), соответствующие межзонному переходу. Высокая интенсивность спектральной полосы, обобщенной с дефектными состояниями, говорит об их существенном вкладе в процессы люминесценции [11].

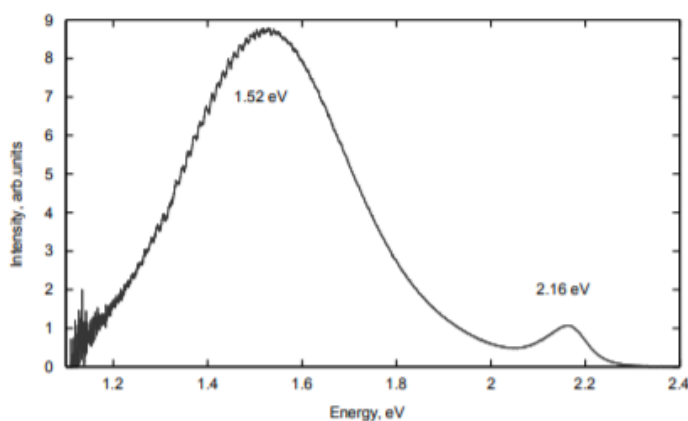


Рисунок 3 - Спектр люминесценции нанокристаллов CdSe при оптическом возбуждении 3,06 эВ (405 нм) [11]

1.3. Двухфотонное поглощение в монокристаллах GaAs

Двухфотонное поглощение – нелинейный процесс, при котором два фотона поглощаются одновременно [12]. Для возникновения данного процесса необходимо наличие квантового перехода с частотой ω_0 , при которой $h\omega_0 = 2h\omega$, при этом вероятность однофотонного поглощения пропорциональна интенсивности излучения, а вероятность двухфотонного поглощения пропорциональна квадрату интенсивности [13]. Явление двухфотонного поглощения несет важность с точки зрения исследования физических характеристик полупроводников и различных процессов, происходящих в них. Позволяет осуществлять в экспериментах генерацию молекулярных состояний, не достижимых при однофотонном возбуждении [14].

Экспериментальные исследования двухфотонного поглощения в кристаллах GaAs проводились в [15] с помощью неодимового лазера ($\lambda = 1,06$ мкм)

на различных образцах разными методами измерений. Производилось измерение константы двухфотонного поглощения GaAs (n-типа, толщиной 1,6 мм) для четырех различных длин волн. Длительность импульса: 40 - 60 нс, диаметр пучков: 1,5 - 2 мм, максимальная интенсивность излучения при попадании на образец — 20 МВт/см². Был зарегистрирован спектр двухфотонного поглощения (рисунок 4), с максимумом 1,5 эВ (~ 826, 7 нм).

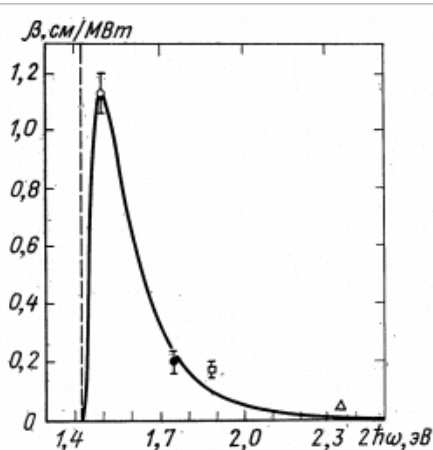


Рисунок 4 - Спектр двухфотонного поглощения в GaAs [15]

1.4. Самофокусировка лазерного излучения в газах и твердых телах

Самофокусировка света связана с нелинейной добавкой к показателю преломления среды в высокоинтенсивном световом поле, что влечет искривление волнового фронта лазерного пучка [16]. Явление самофокусировки часто наблюдается, когда излучение, генерируемое фемтосекундными лазерами, проходит через твердые тела, жидкости и газы.

Если рассматривать данное явление подробнее, то при распространении ограниченных пучков возникает явление нелинейной рефракции, т.е. однородная нелинейная среда становится неоднородной [17]. При прохождении через вещество, луч высокой мощности изменяет свойства вещества, в то же время искривляется и путь самого луча. При изменении показателя преломления среды (вещества), можно наблюдать увеличение концентрации энергии в поле пучка или рассеяние. Вещество, показатель преломления которого увеличивается с увеличением напряженности электрического поля, выступает в роли фо-

кусирующей линзы. Обратное явление дефокусировки происходит при уменьшении показателя преломления.

Ключевым понятием для явления самофокусировки пучка является критическая мощность светового пучка, определяемая как [18]:

$$P_{cr} = \frac{1,86}{32\pi^2} \cdot \frac{\lambda^2 c}{n_2} \quad (1)$$

Где λ – длина волны излучения; c – скорость света в вакууме.

В реальных световых пучках интенсивность и показатель преломления возрастают от краев к оси пучка. Лучи, в свою очередь, при превышении пороговой мощности искривляются в сторону оси и собираются в области большей интенсивности. Тогда как лучи распространяются перпендикулярно к касательной волнового фронта и сходятся к оси, пучок испытывает самофокусировку, а интенсивность излучения на оси возрастает лавинообразно [17].

1.5. Регистрация филамент в воздухе

Филаментацией называется явление локализации энергии светового поля в тонкой протяженной нити, визуальной характеризующей путь лазерного луча. Образование нити происходит вследствие самофокусировки лазерного излучения в среде. Это явление представляет значимость и заинтересованность в связи с большим количеством возможных применений. Например, поскольку в режиме филаментации возможно передавать излучение на большие расстояния с сохранением высокой интенсивности, филаменты могут использоваться для управления высоковольтными разрядами [19].

В 1990-х годах были зарегистрированы тонкие протяженные нитевидные образования с высокой плотностью энергии ЛИ при распространении в атмосфере. При образовании филаментов в газах и прозрачных диэлектриках происходят такие процессы как генерация плазменных каналов с формированием излучения суперконтинуума (широкополосного излучения), усиление лазерного излучения при взаимодействии со средой и др. Фотоионизация среды происходит ввиду высокой интенсивности светового поля в сформированном кана-

ле лазерного излучения, за лазерным каналом образуется множество плазменных каналов [20].

На начальной стадии развития происходит самофокусировка лазерного луча в результате нелинейности среды. Данный процесс происходит, когда пиковая мощность лазерного излучения превышает критическую мощность самофокусировки в среде. В воздухе критическая мощность самофокусировки составляет 2-6 ГВт на длине волны 800 нм и около 70 МВт на 248 нм [21], то есть уменьшается пропорционально длине волны.

Исключительные свойства явления филаментации открывают перспективы дальнейшего развития в области лазерных технологий для применения в атмосферной оптике, спектроскопии и микрооптике, например, при детектировании загрязняющих веществ в атмосфере, а также при направленной передаче лазерной энергии [22].

В статье [23] рассмотрены основы регистрации филаментов и их параметров в воздухе. Обычно для получения фемтосекундных лазерных импульсов и филаментации в воздухе используется тераваттный титан-сапфировый лазер с частотой следования импульсов 10 Гц. При измерении в воздухе параметров плазменного канала используются различные методы. Изображение филамента при распространении в воздухе приведено на рисунке 5.

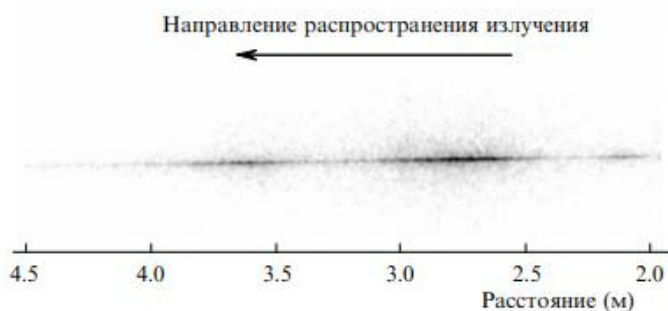


Рисунок 5 – Образованный филамент при распространении в воздухе импульсного излучения (800 нм; 13 мДж; 45 фс на полувысоте) [23]

Диаметр филамент составил 100 мкм, остальные параметры филамент, зарегистрированные в воздухе приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Экспериментально зарегистрированные параметры филаментации лазерного излучения в воздухе на разных длинах волн [23]

Длина волны, нм	Плотность излучения в филаменте, Вт/см ²	Радиус филамента, мкм	Концентрация электронов, см ⁻³	Радиус плазменного канала, мкм
248	10^{12}	100-150	$3 \times 10^{15} - 10^{16}$	-
406	-	100	-	-
527	6×10^{12}	120	-	-
800	$5 \times 10^{13} - 10^{14}$	80-150	$10^{16} - 10^{17}$	50-65
1053	5×10^{12}	100-1000	10^{16}	-

1.6. Филаментация лазерного излучения в стекле

В работе [24] было выполнено определение длины филамента, регистрируемое по длине плазменного канала, а также исследовано распределение интенсивности в поперечном профиле пучка. Источник лазерного излучения – фемтосекундный лазер, работающий на длине волны ~ 1029 нм с энергией 150 мкДж и $\tau_{\text{и}} = 280$ фс, частота следования импульсов – 10 кГц. Облучаемый образец – оптическое кварцевое стекло КУ-1 (5 x 5 x 20 мм). Блок-схема эксперимента, по которой осуществлялась регистрация филамент, приведена на рисунке 6.

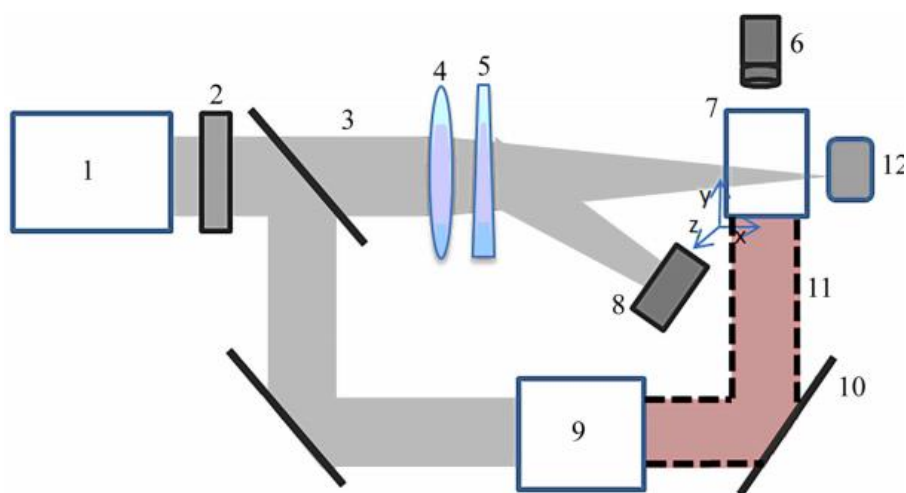


Рисунок 6 – Блок-схема эксперимента: 1 – иттербиевый лазер; 2 – поляризационный ослабитель; 3 – лазерное излучение; 4 – линза; 5 – оптический клин; 6 – фотокамера; 7 – исследуемый кристалл; 8 – фотодиодный приемник; 9 – ча-

стотный преобразователь; 10 – отражающее зеркало; 11 – ЛИ (257 нм); 12 – прибор для измерения поперечного распределения интенсивности ЛИ [24]

Фокус линзы 4 был расположен за задней гранью образца, для предотвращения его разрушения. Регистрация зоны филаментации проводилась с помощью CCD-камеры. На рисунке 7 приведено изображение филаментов при различных значениях мощности лазерного излучения. Как видно, с увеличением мощности длина филаментов увеличивается.



Рисунок 7 – Филаментация ЛИ в кварце [24]

Также в работе [24] экспериментальным способом было определено значение критической мощности излучения, равное 5,18 мВт. При мощности 38,5 мВт был обнаружен эффект образования множественной филаментации.

Из результатов исследований, проведенных в работе [24] следует, что образование тонких нитей – филаментов можно наблюдать при более низких значениями мощности, а визуально филаменты могут быть не обнаружены.

Авторами работы [25] проведено исследование пространственных характеристик области множественной филаментации гигаваттных импульсов титан-сапфирового лазера в стекле. Показано, что формирование множественной филаментации происходит с достижением пороговой интенсивности в пучке, пространственные характеристики которой зависят от времени воздействия импульсно-периодического лазерного излучения. Лазерный импульс, направленный на образец стекла марки К8, испытал в нём самофокусировку при достижении энергии импульса ~ 2 мДж и критической мощности самофокусировки 2 МВт. Прослеживалось уменьшение диаметра пучка d_0 с 7 до 3,5 мм.

Из рисунка 8 видно, что с увеличением энергии импульса форма образованных филаментов изменяется от неравномерно распространяющихся в центре пучка филаментов в коническую форму с диаметром пучка на входе в стекло.

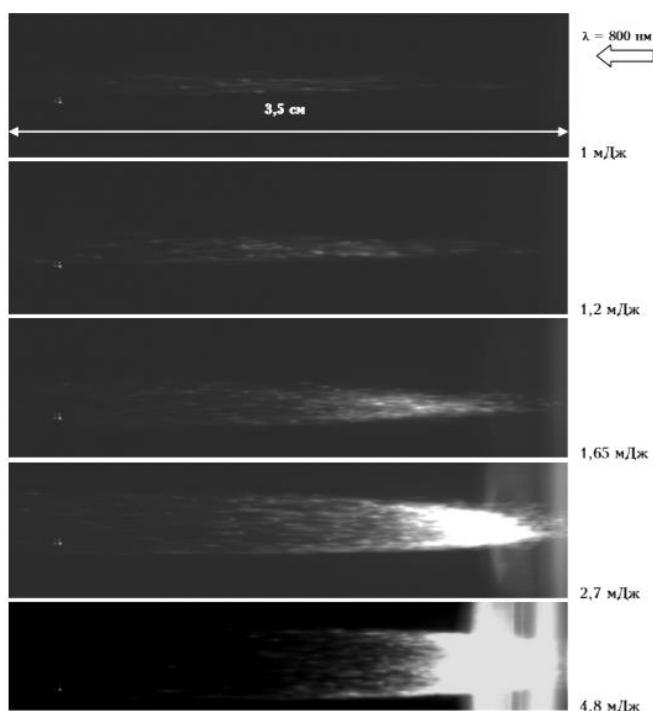


Рисунок 8 – Область распределения филаментов в стекле при изменении энергии лазерного импульса [25]

1.7. Филаментация и самофокусировка света в кристаллах LiF

Филаментация лазерного излучения в конденсированных средах также была исследована в серии работ на примере кристалла LiF с шириной запрещенной зоны ~ 14 эВ. В работе [26] исследуемые образцы LiF имели размер примерно 10x30x10 мм. Облучение происходило титан-сапфировым лазером с длиной волны 950 нм. Схема облучения приведена на рисунке 10.

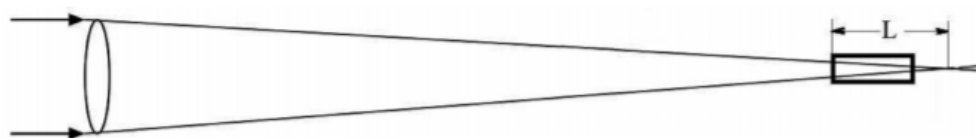


Рисунок 10 - Схема воздействия фемтосекундным лазерным излучением на кристаллы LiF в режиме внешней фокусировки [26]

В общей сложности энергия лазерного излучения, направленного на образец, определялась числом импульсов облучения. Исследования осевого про-

пространственного распределения запасаемой энергии проводилось с помощью метода, основанного на термостимулированной люминесценции. Спектры фотолюминесценции возбуждались пикосекундными лазерными импульсами.

В работе [27] объектом исследования выступали плоскопараллельные пластины LiF и MgF_2 с полированными поверхностями. Регистрировалось пространственное распределение интенсивности свечения вдоль и поперек лазерного канала. Были получены агрегатные центры окраски с концентрацией достаточной для регистрации, в широкозонных кристаллах (13-14 эВ), формируемые только в продольных филаментах, на которые делится лазерный луч при распространении в диэлектрике (рисунок 11).

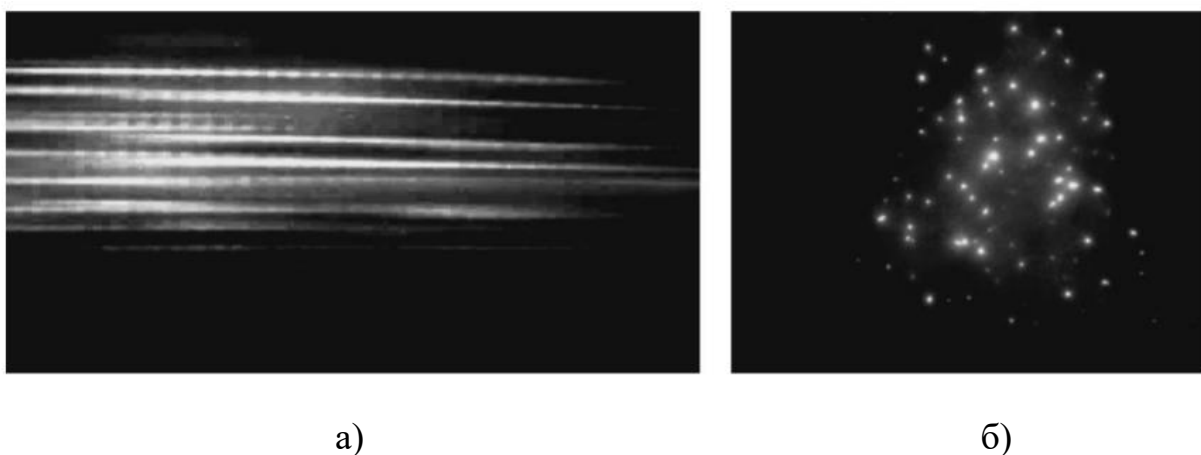


Рисунок 11 – Пространственное распределение интенсивности люминесценции центров окраски под действием лазерного излучения: а) в продольном сечении; б) в поперечном сечении [27]

Параметры излучения:

- Длительность импульсов: 30 фс;
- Энергия кванта 1,4 эВ, соответствующая первой гармонике;
- Энергия 0,5 мДж;
- Частота следования 1000 Гц;
- Фокусировка излучения линзой с $F = 30$ см.

Утверждение, что образование филаментов в кристалле происходит не со входа излучения в кристалл, а через некоторое расстояние подтверждается в данной работе [27], как и в ранее приведенных работах.

В диссертации [28] рассмотрены процессы филаментации и самофокусировки лазерного излучения при распространении коротких импульсов в кристаллах LiF, образование ЦО. На основании экспериментальных исследований было отмечено, что происходит многофотонная ионизация.

Параметры лазерного излучения:

- энергия фотона первой гармоники титан-сапфирового лазера $\sim 1,55$ эВ, длина волны 800 нм;
- частота следования импульсов до 1 кГц;
- энергия отдельных импульсов до 0,5 мДж.
- длительность импульсов на полувысоте 30 фс;

Образцы перемещались согласованно с направлением лазерного луча. Продольное облучение образца было необходимо для концентрации излучения на поверхности кристалла и в объеме, что дает возможность разделить воздействие одиночных импульсов на образец. После завершения воздействия лазера для возбуждения ЦО использовались дополнительные источники возбуждения с длинами волн 405 и 660 нм и светодиод с длиной волны 455 нм. Свечение образца и образованные филаменты регистрировались цифровой фотокамерой в процессе облучения и передавались на оптический спектрометр [28].

На рисунке 12 представлена фотография поперечного сечения каналов в кристалле LiF, облучаемого большим количеством импульсов $\sim 10^4$. Каналы лазерного излучения имеют форму колец при возбуждении люминесценции центров окраски.

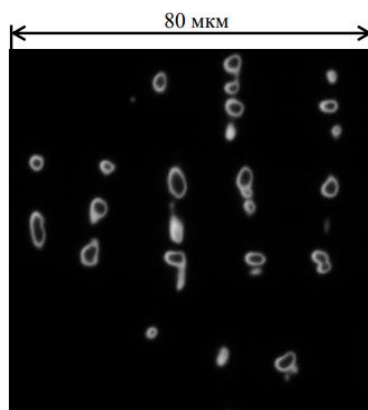


Рисунок 12 – Образованные каналы в LiF - поперечное сечение [28]

В работе [20] было исследовано образование каналов с центрами окраски в кристалле LiF, который был облучен одиночными импульсами первой гармоники титан-сапфирового лазера (950 нм; 50 фс; 7,8 мДж). Начальный диаметр луча на входе в образец равен приблизительно 1 мм. Линза ($F = 425$ мм), применяемая в схеме облучения выполняет функцию фокусировки пучка и увеличения интенсивности излучения, передаваемой на входную поверхность кристалла, геометрический фокус линзы располагается вблизи выходной поверхности. В данном режиме облучения наблюдалась филаментация лазерного импульса, которая способствовала образованию люминесцентного канала в LiF (рисунок 13) при распространении слева на право. Области входной и выходной поверхности кристалла расположены на фотографии по краям.



Рисунок 13 - Люминесцентный канал в кристалле LiF, сформированный под действием филаментации одиночного фемтосекундного лазерного импульса [20]

Длина образованного канала составила около 3 см, а диаметр на максимальной ширине канала около 1 мм. Возбуждение центров окраски (обозначаемых как F_2 и F_3^+) происходило с помощью лазера непрерывного действия с $\lambda = 470$ нм. Длина нитей зарегистрированной филаментации варьируется от 50 мкм до 0,5 мм. При этом большая часть плазмы образуется при интенсивностях порядка 10^{13} - 10^{14} Вт/см² [20].

1.8. Основные выводы из литературного обзора

Изучив литературу по теме данной работы, можно сделать следующие выводы. Самофокусировка световых пучков (или филаментация) — это наиболее яркий эффект нелинейной оптики. В сильном световом поле показатель преломления среды возрастает вследствие нелинейности, обусловленной эффектами Керра и электрострикции. Поэтому на границе светового пучка лучи,

преломляясь, отклоняются к его оси, что вызывает сжатие пучка и рост пиковой интенсивности. Явление филаментации мощного лазерного излучения в конденсированных средах и газах привлекает широкий интерес в связи с большим количеством возможных применений.

Филаменты в диэлектрических кристаллах и стеклах изучают для выяснения особенностей взаимодействия интенсивного лазерного излучения с функциональными элементами мощных лазерных систем. Поскольку диэлектрические среды обладают широким спектральным диапазоном прозрачности от вакуумного УФ до средней ИК - области, то видимое и ближнее ИК-излучение, генерируемое стандартными лазерами, в линейном режиме возбуждения, вообще не поглощается такими средами. Однако при большой интенсивности лазерного излучения начинаются процессы высоконелинейного взаимодействия света и вещества [26]. Нелинейное поглощение света может приводить, как к нежелательным процессам, например, к разрушению оптических элементов мощных лазерных установок, так и к возможности использования этого явления в лазерных технологиях, в частности для модификации показателя преломления, что необходимо для записи качественных волноводов в диэлектриках [29].

1.9. Постановка цели и задачи исследований

Нелинейные процессы, развивающиеся в конденсированных средах при возбуждении мощными импульсами лазерного излучения, все больше привлекают внимание исследователей. К таким нелинейным явлениям относятся - филаментация лазерного излучения и многофотонная люминесценция кристаллов. К настоящему времени получены данные о филаментации лазерного излучения в стеклах, кристаллах LiF и в газовых средах. Что касается полупроводниковых кристаллов группы $A^{II}B^{VI}$, то такая информация в литературе отсутствует.

Целью настоящей работы является изучение спектров люминесценции полупроводникового кристалла CdSe при двухфотонном возбуждении в условиях филаментации возбуждающего лазерного излучения и их сравнение со

спектрами, полученными при однофотонном ультрафиолетовом и электронно-пучковом возбуждении.

Задачи исследований:

- 1) Измерение порога возбуждения филаментации и пространственного распределения филамент в кристалле CdSe при возбуждении первой гармоникой Nd- лазера (1064 нм, 14 нс).
- 2) Измерение спектров и порогов ДВЛ кристаллов CdSe, CdTe, GaAs.
- 3) Сравнение спектров ДВЛ полупроводниковых кристаллов со спектрами однофотонно возбуждаемой люминесценции (ОВЛ) и спектрами, полученными при электронно-пучковом возбуждении.
- 4) Изучить возможность перехода спонтанной ДВЛ в режим вынужденного излучения путем сравнения спектров ДВЛ со спектрами, полученными при электронно-пучковом возбуждении.

2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты исследований

В качестве объектов для исследований использовались пластины полупроводниковых кристаллов (таблица 3) размерами $2 \times 2 \text{ см}^2$ и толщиной 2 мм, полученные сублимацией из газовой фазы.

Таблица 3 – Образцы исследований

Химическая формула	Ширина запрещенной зоны, эВ	Показатель преломления
CdSe	1,8	2,6
CdTe	1,6	2,8
GaAs	1,43	3,6

2.2. Лазерный стенд для исследования филаментации и двухфотонно возбуждаемой люминесценции полупроводниковых кристаллов

Экспериментальная установка для исследования филаментации и двухфотонно возбуждаемой люминесценции полупроводниковых кристаллов, инициируемого лазерным излучением приведена на рисунке 14.

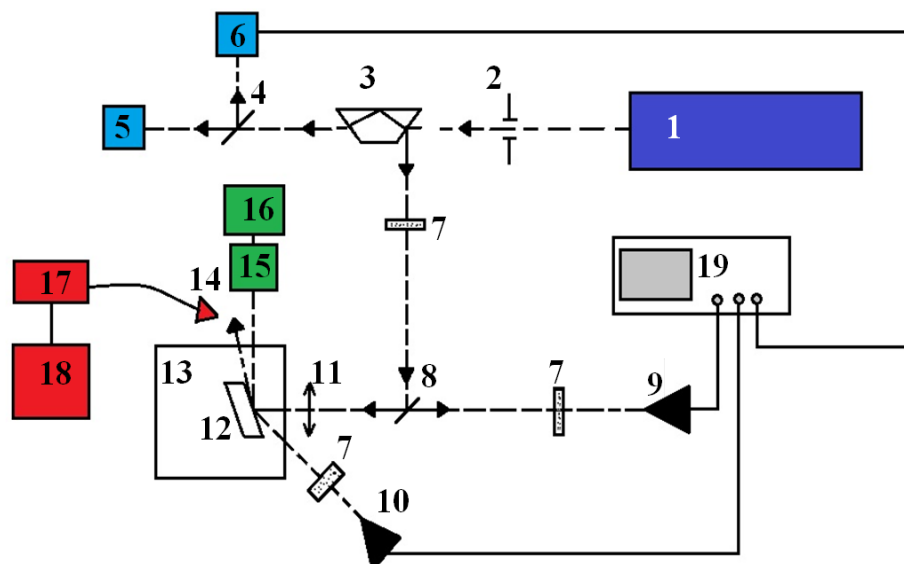


Рисунок 14 – Лазерный стенд для исследования филаментации и двухфотонно возбуждаемой люминесценции полупроводниковых кристаллов:

1 – неодимовый лазер ($\lambda = 1\,064 \text{ нм}$, $\tau = 14 \text{ нс}$); 2 – формирующая диафрагма; 3 – призма Дове; 4 – светоделительная пластинка; 5 – ИКТ-1Н; 6 – фотозелемент коаксиальный ФК-19; 7 – светофильтры (НС); 8 – диэлектрическое зерка-

ло; 9 – ФЭУ зонный; 10 – ФЭУ панорамный; 11 – кварцевый объектив, строящий изображение диафрагмы; 12 – образец; 13 – вакуумная камера; 14 – оптоволокно; 15 – микроскоп МБС-10; 16 - матрица фотоаппарата Canon EOS 600D; 17 – спектрометр AvaSpec Dual; 18 – ПК; 19 – осциллограф Tektronix DPO 3034.

В качестве источника возбуждения в экспериментах использовался Nd:YAG лазер ($\lambda = 1064$ нм, 150 мДж) (1), максимальная плотность энергии (H) на поверхности исследуемых мишеней достигает ~ 20 Дж/см². В системе применена проекционная схема, благодаря которой на поверхности образца формируется пучок с однородным распределением плотности энергии. Лазерное излучение (1) делилось с помощью призмы Дове (3) на измеритель энергии лазерного импульса ИКТ-1Н (5) и интерференционным зеркалом (4) на фотоприемник ФЭК-1 (6) для измерения длительности и формы лазерного импульса. Основной пучок направлялся в оптический тракт для облучения образца. Энергия импульса на поверхности образца измерялась пирозлектрическим измерителем энергии и изменялась с помощью набора нейтральных светофильтров разной оптической плотности (7). Формирование однородного пучка происходило с помощью диафрагмы (2) и объектива (11) (фокусное расстояние 50 мм) в пятно диаметром 1 мм. Пучок перпендикулярно направлялся на образец (12), который находился в вакуумной камере (13) или в атмосферном воздухе. Кинетика свечения лазерной плазмы регистрировалась зонным ФЭУ (9) и панорамным ФЭУ (10). Сигналы с ФЭУ измерялись осциллографом (19). Синхронизация двух каналов ФЭУ, регистрирующего кинетику люминесценции кристаллов и кинетику свечения приповерхностной лазерной плазмы (ПЛП) и ФЭК, регистрирующего форму ЛИ, осуществлялась с помощью свечения прессованных образцов сахара (химическая формула $C_{12}H_{22}O_{11}$), являющегося преобразователем первой гармоники Nd-лазера во вторую (532 нм). Точность привязки кинетики люминесценции и свечения ПЛП к лазерному импульсу составляет ~ 2 -3 нс. Пространственная картина ДВЛ и свечения ПЛП фотографировалась фотоаппаратом Canon Eos 600D (16) через микроскоп МПД-10 (15). С помощью спектрометра AvaSpec Dual (17) регистрировался спектр свечения лазерной

плазмы за один импульс возбуждения (без временного разрешения). Временное разрешение измерительной системы составляло ≈ 3 нс, пространственное ≈ 10 мкм.

Для регистрации интегрального спектра фотолюминесценции и спектра свечения приповерхностной лазерной плазмы (ПЛП) попеременно используются два оптоволоконных спектрометра:

- AvaSpec DUAL (спектральный диапазон 220-900 нм, спектральное разрешение 1,5 нм);
- AvaSpec 2048L (спектральный диапазон 340-1100 нм, спектральное разрешение 3 нм).

Использование двух спектрометров обусловлено различием их параметров. AvaSpec DUAL обладает лучшим спектральным разрешением, что позволяет с большей точностью определять длину волны спектральной линии, но спектральный диапазон, состоящий из двух участков, представляет дополнительные сложности для регистрации сплошного спектра плазмы.

2.3. Импульсный спектрометр для измерения спектрально-кинетических характеристик катодо- и одnofотонной люминесценции кристаллов

Схема экспериментальной установки для исследования спектрально-кинетических характеристик полупроводниковых кристаллов (рисунок 15) включает в себя:

- импульсный сильноточный ускоритель электронов (ИСУЭ) со средней (эффективной) энергией электронов $E_{\text{ср.}} \sim 250$ кэВ, длительность импульса тока пучка $\tau \sim 12$ нс;
- оптоволоконный спектрометр AvaSpec-Dual (позволяет измерять интегральный спектр свечения);
- монохроматор МДР-23;
- ФЭУ- 84;
- осциллограф DPO-3034;
- компьютер.

Монохроматор МДР-23, ФЭУ, источники питания, осциллограф и ИСУЭ составляют единую измерительную систему – импульсный оптический спектрометр, с помощью которого регистрировались спектры люминесценции полупроводников.

- Спектральный диапазон измерений: (250 - 850) нм;
- Временное разрешение: 10 нс;
- Плотность энергии электронного пучка: (0,01 - 0,2) Дж/см²;
- Обратная линейная дисперсия монохроматора МДР-23: 1,3 нм/мм [30].

С помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ - 118 (область спектральной чувствительности 250-850 нм) регистрируется оптический сигнал, и далее регистрируется скоростным запоминающим осциллографом Tektronix DPO-3034. Временное разрешение регистрирующего тракта ~10 нс.

Спектрально-кинетические измерения импульсной катодолюминесценции производились путем снятия осциллограмм свечения образцов при различных длинах волн после облучения образцов электронным пучком.

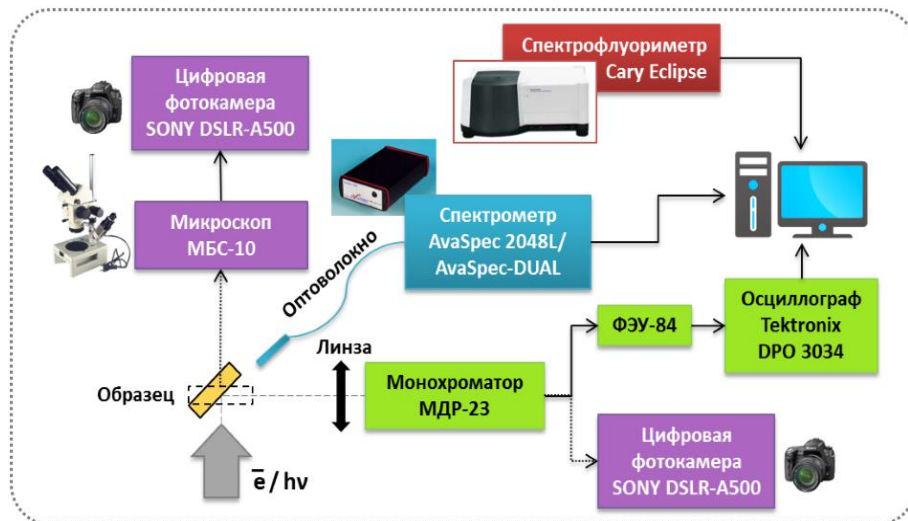


Рисунок 15 – Блок-схема импульсного оптического спектрометра с возбуждением образцов электронным или лазерным пучком [30]

В ходе работы облучение исследуемых образцов сильноточным электронным пучком происходило при различных геометриях облучения, показанных на рисунке 16. Также измерения спектральных характеристик ИКЛ проис-

ходило при различных плотностях энергии СЭП, плотность энергии изменялась при помощи металлической фольги.

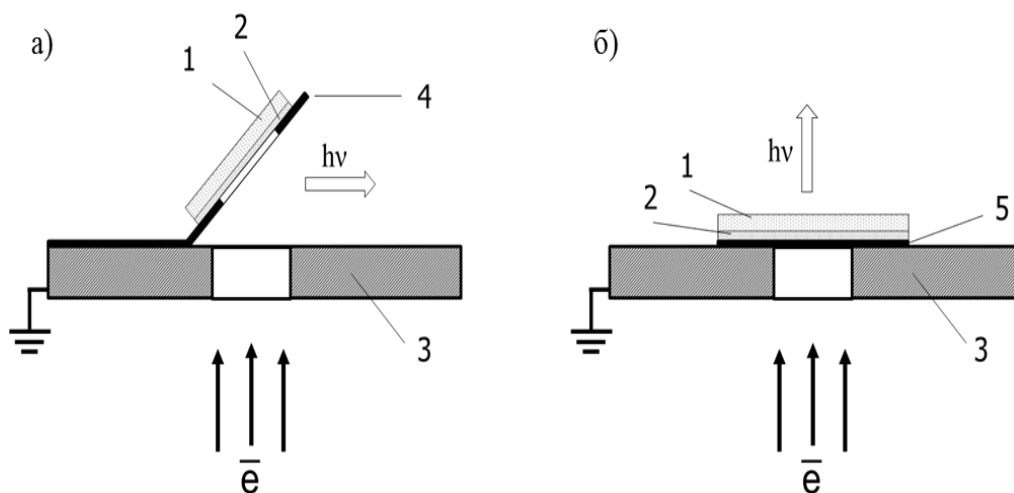


Рисунок 16 - Схемы облучения исследуемых образцов СЭП под углами 45° (а) и 0° (б) к поверхности пластины: 1 – сапфировая подложка; 2 – эпитаксиальные слои структуры; 3 – диафрагма-коллиматор; 4 – держатель; 5 – металлическая фольга [30]

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Научно-исследовательская работа представляет собой процесс регистрации явления филаментации лазерного излучения в полупроводниковых кристаллах селенида кадмия и регистрации спектрально-кинетических характеристик свечения катодо- и фотолюминесценции исследуемых образцов при возбуждении электронным и лазерным пучком. Образцы исследования – полупроводниковые кристаллы CdSe, CdTe, GaAs. Помимо этого, блок-схема эксперимента включает в себя цифровую фотокамеру, спектрометр, и другие необходимые приборы. Работа выполнялась в лаборатории ТПУ под контролем научного руководителя.

Целью данного раздела является экономическое обоснование целесообразности научно-исследовательской работы, выявление возможных потребителей, заинтересованных в данном исследовании, расчет бюджета проекта. Для эффективного достижения поставленных целей научно-исследовательской работы необходимо составление календарного плана работ и распределение обязанностей среди исполнителей.

4.1. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Процесс филаментации лазерного излучения в полупроводниковых кристаллах и регистрация их спектрально-кинетических характеристик, в первую очередь, представляет интерес для исследовательских лабораторий, деятельность которых связана с люминесцентной диагностикой свойств полупроводниковых кристаллов. Данная тематика исследовательской работы находит применение в атмосферной оптике для зондирования атмосферы, представляет интерес в развитии нелинейной оптики, образцы исследования применяются в качестве материалов активных сред полупроводниковых лазеров и т.п.

В связи с этим произведем сегментирования рынка услуг по применению результатов исследований работы (таблица 4).

Таблица 4 – Карта сегментирования рынка услуг по направлениям применения исследования

		Направление исследования		
		Атмосферная оптика	Полупроводниковые лазеры и устройства	Нелинейная оптика
Тип организации	Исследовательские лаборатории	+	+	+
	Научные институты	+	+	+
	Научные группы	+	+	+
	Предприятия по изготовлению полупроводниковых приборов	–	+	–

4.1.2. Технология QuaD

Технология QuaD позволяет оценить целесообразность проведения исследования процесса филаментации лазерного излучения в полупроводниковых. Для данного разработки подобраны веса критериев согласно основным задачам работы, связанным с использованием экспериментальной установки,

включающей лазер с определенными параметрами и приборы для регистрации спектрально-кинетических характеристик излучения. Технология QuaD близка к методике оценки конкурентных технических решений [31]. Оценка целесообразности разработки представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,06	75	100	0,75	4,5
2. Помехоустойчивость	0,04	70	100	0,7	2,8
3. Надежность	0,1	70	100	0,7	7
4. Унифицированность	0,03	40	100	0,4	1,2
5. Уровень материалоемкости разработки	0,1	80	100	0,8	8
6. Уровень шума	0,04	45	100	0,45	1,8
7. Безопасность	0,07	60	100	0,6	4,2
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	40	100	0,4	0,8
9. Функциональная мощность	0,1	75	100	0,75	7,5
10. Простота эксплуатации	0,05	50	100	0,5	2,5
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,02	45	100	0,45	0,9
12. Ремонтопригодность	0,12	75	100	0,75	9
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
13. Конкурентоспособность продукта	0,05	35	100	0,35	1,75
14. Уровень проникновения на рынок	0,02	45	100	0,45	0,9

Продолжение таблицы 5

15. Перспективность рынка	0,08	60	100	0,6	4,8
16. Цена	0,1	65	100	0,65	6,5
Итого	1				64,15

Полученное средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки составило 64,15 балла, это соответствует перспективности разработки выше среднего.

4.1.3. SWOT-анализ

SWOT-анализ позволяет определить сильные и слабые стороны научной разработки для получения четкого представления направления развития научного проекта и защиты от потенциальных угроз. Результаты SWOT-анализа учитываются при разработке структуры работ и представлены в таблице 6.

Таблица 6 – SWOT-анализ

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Низкие затраты на исследовательскую работу; С2. Опытный и квалифицированный персонал; С3. Доступность информации по данному направлению исследований; С4. Малое количество конкурентов в данном направлении исследований;	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Значительная доля устаревшего оборудования для исследований; Сл2. Отсутствие интереса со стороны потребителей; Сл3. Отсутствие финансовой поддержки; Сл4. Склонность к традиционным направлениям, формам и методам исследований;
Возможности: В1. Участие в научных конференциях для расширения данного направления исследований и получения знаний; В2. Реализация внутривузовских грантов;	Используя полученные навыки работы в данной тематике и результаты исследований можно сотрудничать с проектными группами по созданию различных приборов, используемых спросом.	Может быть использована научно-исследовательская база ТПУ, а также оборудование предприятий, которые сотрудничают с отделением ТПУ.

Продолжение таблицы 6

ВЗ. Сотрудничество с учреждениями, заинтересованными в данной тематике;		
Угрозы: У1. Появление других научных разработок с лучшими полученными результатами; У2. Внезапное обновление информации, связанное с открытием новых явлений или развитием новых технологий;	Поиск необходимых материалов с помощью большого количества информационных ресурсов и патентного поиска, увеличение времени исследований способствует накоплению более значимого конечного результата работы.	Данная тематика позволяет переопределение направления исследования, например, заменой объекта исследования (одних полупроводниковых кристаллов на другие) или усовершенствование метода исследования.

4.2. Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1. Структура работ в рамках научного исследования

Выполнение научно-исследовательской работы осуществляется группой, в состав которой входят научный руководитель и инженер. За каждый этап работы отвечает исполнитель, распределение исполнителей по видам работ представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение информации по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследований	Инженер, научный руководитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Инженер, научный руководитель
	5	Подготовка оборудования и образцов к эксперименту	Инженер, научный руководитель

Продолжение таблицы 7

	6	Проведение эксперимента	Инженер, научный руководитель
	7	Обработка полученных данных	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обсуждение результатов и выводов по работе	Инженер, научный руководитель
Подготовка отчетной документации	9	Оформление полученных результатов и написание ПЗ	Инженер

4.2.2. Разработка графика проведения научного исследования

Научно-исследовательская работа выполнялась на протяжении 92 календарных дней, каждому этапу работы соответствует определенный отрезок времени, календарный план-график проведения работ представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Календарный план-график проведения НИКОР по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители (НР - научный руководитель, И - инженер)	$T_{\text{кал}}$, кал. дн.	Продолжительность выполнения работ								
				март			апрель			май		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	Составление и утверждение технического задания	НР	5									
2	Подбор и изучение информации по теме	И	21									
3	Выбор направления исследований	НР, И										
4	Календарное планирование работ по теме	НР, И	1									
5	Подготовка оборудования и образцов к эксперименту	НР, И	4									

Продолжение таблицы 8

6	Проведение эксперимента	НР, И	19									
7	Обработка полученных данных	И	18									
8	Обсуждение результатов и выводов по работе	НР,И	7									
9	Оформление полученных результатов и написание ПЗ	И	21									

■ - руководитель ■ - инженер

4.3. Бюджет научно-технического исследования

В процессе формирования бюджета НТИ были рассмотрены следующие статьи затрат:

1. материальные затраты НТИ;
2. затраты на специальное оборудование для научных работ;
3. основная заработная плата исполнителей темы;
4. дополнительная заработная плата исполнителей темы;
5. отчисления во внебюджетные фонды;
6. накладные расходы.

4.3.1. Расчет материальных затрат НТИ

В данной статье учитываются затраты на все материалы, сырье и оформление документации, используемые при разработке проекта. Расчет затрат осуществляется по формуле [31]:

$$З_m = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m Ц_i \cdot N_{расхi} \quad (1)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.);

$Ц_i$ – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб.)

k_T - коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, зависит от условий договорной поставки (15-20 % от цены).

Результаты по статье приводятся в таблице 9.

Таблица 9 – Материальные затраты НТИ

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы (З _м), руб.
Образцы исследования	шт	9	500	4500
Итого затраты на материалы				4500
Транспортно-заготовительные расходы (15 %)				675
Итого по статье				5175

4.3.2. Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Для данного проекта затраты на приобретение специального оборудования составляют основную часть бюджета. Покупка оборудования необходима для выполнения исследования в полном объеме. Так как для данного исследования оборудование не приобреталось отдельно, а было в наличии, следует рассчитать амортизацию данного оборудования.

Расчет годовой суммы амортизации производится по следующей формуле [32]:

$$A_{год.} = C_{перв.} \cdot H_A = \frac{C_{перв.}}{n}; \quad (2)$$

где $C_{перв.}$ – первичная стоимость оборудования, тыс. руб.;

H_A – годовая норма амортизации, рассчитываемая как $\frac{1}{n}$;

n – срок полезного использования оборудования, лет.

Тогда ежемесячная сумма амортизации $A_{мес.}$ (в рублях) вычисляется по формуле:

$$A_{\text{мес.}} = \frac{C_{\text{перв.}}}{n \cdot 12}; \quad (3)$$

Учитывая, что оборудование использовалось в проекте 1,5 месяца (45 рабочих дней), амортизационные отчисления за период использования оборудования в проекте $A_{1,5\text{мес.}}$ (в рублях) найдем по формуле:

$$A_{1,5 \text{ мес.}} = \frac{C_{\text{перв.}}}{n \cdot 12} \cdot 1,5;$$

Амортизация используемого оборудования представлена в таблице 10.

Таблица 10 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование оборудования	Количество оборудования, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Срок полезного использования оборудования, лет	Амортизационные отчисления, руб.
Фотоаппарат Canon EOS 600D	1	11000	5	275
Nd:YAG лазер	1	2000	12	20083.33
Спектрометр AvaSpec-DUAL	1	68000	5	1700
Спектрометр AvaSpec-ULS2048CL-EVO-RS	1	100000	5	2500
Нейтральные светофильтры (комплект)	1	1,2	5	30
Микроскоп МБС-10	1	35000	5	875
Линза ($f = 100 \text{ мм}$)	1	2800	5	70
Осциллограф DPO 3034	1	195000	10	2437.5
ФЭУ-84	1	3000	5	75
Итого по статье				28045.83

4.3.3. Основная заработная плата исполнителей темы

В данной статье учитывается основная заработная плата исполнителей научно-исследовательской работы, включая премии, доплаты, и рассчитывается [31]:

$$Z_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} \quad (3)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{\text{осн}}$).

Основная заработная плата научного руководителя определяется по формуле [31]:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot T_p \quad (4)$$

где $З_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. (45 раб. дн.);

$З_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

$$З_{\text{дн}} = \frac{З_m \cdot M}{F_d} \quad (5)$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб. Для научного руководителя составляет 35000 руб., для инженера возьмем 20000 руб.

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 48 раб. дней $M=10,4$ месяца, 6 - дневная неделя;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 11).

Таблица 11 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней		
выходные дни	52	52
праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
отпуск	48	48
невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	251	251

Таким образом, основная заработная плата руководителя:

$$З_{\text{осн}} = \frac{35000 \cdot 10,4}{251} \cdot 45 = 65259 \text{ руб.};$$

Инженера-исполнителя:

$$З_{\text{осн}} = \frac{20000 \cdot 10,4}{251} \cdot 45 = 41020 \text{ руб.};$$

Сведения о заработной плате исполнителей проекта приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет основной заработной платы

Исполнители	З _м , руб.	З _{дн} , руб.	Т _р , раб.дн.	З _{осн} , руб.
Руководитель	35000	1450.2	45	65259
Инженер	20000	911.55	45	41020

4.3.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительные выплаты учитывают отклонение от нормальных условий труда, обеспечивают гарантии и компенсации. Величина выплат предусматривается Трудовым кодексом РФ.

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле [31]:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}} \quad (6)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (0,15);

Результаты расчета дополнительной и итоговой заработной платы содержатся в таблице 13.

Таблица 13 – Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная, руб.	65259	41020
Дополнительная, руб.	9788.85	6153
Итого по статье З _{зп} , руб.	75047.85	47173

4.3.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Для учреждений осуществляющих образовательную и научную деятельность размер страховых взносов составляет 30,2 %. Величина отчислений определяется по формуле [31]:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) \quad (7)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (0,302);

Результаты расчета внебюджетных отчислений представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Отчисления во внебюджетные фонды

	Руководитель	Инженер
$Z_{внеб}$, руб.	22664.45	14246.25

4.3.6. Накладные расходы

В данном пункте учитываются затраты, не вошедшие в предыдущие статьи расходов: печать материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии. Определим величину накладных расходов по формуле [31]:

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 7) \cdot k_{нр} \quad (8)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент накладных расходов, примем 16 %.

Тогда расчёт накладных расходов составит:

$$Z_{накл} = (5175 + 22664.45 + 14246) \cdot 0,16 = 6733.67 \text{ руб.}$$

4.3.7. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Бюджет научно-исследовательского проекта приведен в таблице 15.

Таблица 15 – Полная смета затрат научно-исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб.	Примечание
1. Материальные затраты НТИ	5175	
2. Амортизация на специальное оборудование	28045.83	
3. Затраты по основной заработной	106279	Суммарная заработная плата исполнителей
4. Затраты дополнительной заработной	15941.85	Суммарная заработная плата исполнителей
5. Отчисления во внебюджетные фонды	36910.7	Сумма внебюджетных отчислений исполнителей
6. Накладные расходы	6733.67	
Итого	199086.05	

4.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Исследовательская работа в области изучения процесса филаментации лазерного излучения открывает новые возможности использования фемтосекундных лазерных технологий в микрооптике, модификации материалов, атмосферной оптике и других областях. Результаты работы могут быть представлены в виде публикаций, а также на научных конференциях, данное направление исследование вносит вклад в развитие науки и нанотехнологий в стране.

В данном разделе ВКР был проведен анализ потенциальных потребителей проекта, планирование работ, на выполнение которых необходимо затратить 45 рабочих дней и 92 календарных. С помощью SWOT-анализа проекта были оценены сильные и слабые стороны проекта. По итогу оценки перспективности научно-исследовательского проекта было получено значение 64,15 балла - выше среднего.

Бюджет проекта составил 199086.05 рублей, большая часть затрат составила заработная плата исполнителей. По ресурсопотреблению исследование довольно эффективно, так как не влечет потребление ресурсов больше необходимого уровня и не забирает ресурсы из окружающей среды.

5. Социальная ответственность

Раздел ВКР «Социальная ответственность» посвящен рассмотрению опасных и вредных факторов, влияющих на человека и окружающую среду, анализу безопасности жизнедеятельности человека и нахождению решений для уменьшения влияния вредных и опасных факторов. В процессе работы опасность может нести лазерное излучение, воздействие электромагнитных полей, возможные чрезвычайные ситуации и т.д.

Теоретическая и часть практической работы проводится за компьютером, основной частью работы являлась регистрация спектральных и кинетических характеристик излучения. Объект исследования – образцы полупроводниковых кристаллов – CdSe, CdTe, GaAs. Работа выполнялась в лаборатории ТПУ под контролем руководителя ВКР.

В данном разделе к рассмотрению представлены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. Приведена оптимальная компоновка рабочей зоны при регистрации спектрально-кинетических параметров свечения образцов при лазерном инициировании.

В процессе работы есть некоторая вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций, поэтому необходимо иметь четкие представления о порядке действий в таких ситуациях, а также проводить необходимые мероприятия для предотвращения ЧС.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

Основными задачами трудового законодательства по ТК РФ являются создание необходимых правовых условий для достижения оптимального согласования интересов сторон трудовых отношений [33].

По Трудовому Кодексу РФ продолжительность рабочего времени для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, максимально допустимая продолжительность ежедневной работы не может превышать восемь часов при 36-часовой рабочей неделе. В течении рабочего дня должен предусматриваться перерыв для отдыха и питания не менее 30 минут и не более двух часов [33].

Данный вид работы предусматривает использование средств индивидуальной защиты (СИЗ), которые обеспечивают необходимый уровень защиты жизни и здоровья человека от вредных и опасных факторов. Типовые нормы разработаны согласно специальной оценке условий труда, а СИЗ предусмотрены регламентом [34].

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочее место, его оборудование и оснащение, применяемые в соответствии с характером работы, должны обеспечивать безопасность, охрану здоровья и работоспособность человека.

Работа с лазерным излучением высокой мощности должна проводиться под контролем руководителя, так как к данным типам работы допускаются сотрудники, имеющие IV группу по электробезопасности и прошедшие инструктаж.

При планировке рабочего места необходимо учитывать возможность выполнения рациональных движений, безопасное расположение человека относительно установки, эргономические параметры и т.п.

Эргономические требования к производственному оборудованию должны устанавливаться к тем его элементам, которые сопряжены с человеком при

выполнении им трудовых действий в процессе эксплуатации, монтажа, ремонта, транспортирования и хранения производственного оборудования [35].

Для обеспечения удобного, близкого подхода к рабочему оборудованию должно быть предусмотрено пространство для стоп размером не менее 150 мм по глубине, 150 мм по высоте и 530 мм по ширине [36].

Средства отображения информации необходимо группировать и размещать в пределах групп так, чтобы последовательность их использования осуществлялась слева направо [37].

При организации работы за компьютером следует учитывать удобство положения дисплея, клавиатуры, системного блока, а также зоны досягаемости рук, которые установлены на основании антропометрических данных человеческого тела и дают возможность рационально разместить рабочие устройства.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы [38].

Органами управления при работе с лазерным оборудованием являются тумблеры включения/выключения накачки лазера. Они должны кодироваться формой, цветом, размером или другими обозначениями, а места возможных контактов органов управления с руками работающего должны быть выполнены из нетоксичных, нетеплопроводных и электроизоляционных материалов [39].

5.2. Производственная безопасность.

5.2.1 Анализ выявленных вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть в лаборатории при проведении исследований

Для обеспечения необходимых мер по защите человека и окружающей среды определим возможные вредные и опасные факторы при исследовании взаимодействия лазерного с объектом исследования. Перечень опасных и вредных факторов при работе представлен в таблице 16.

Таблица 16 – Возможные вредные и опасные факторы [40]

Вредные факторы	Эксплуатация	Нормативные документы
1. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* [41]
2. Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны	+	ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности [42]
3. Повышение уровней шума	+	ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности [43]
4. Повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений	+	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009 [44]
Опасные факторы		
Прямое, зеркально или диффузно отраженное лазерное излучение	+	ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация [45]
Опасность поражения электрическим током вследствие повышенного напряжения в источниках электропитания лазеров	+	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов [46]

1) Недостаточная освещенность рабочей зоны приводит к утомлению зрительного аппарата, дискомфорту, снижает работоспособность, может вызывать головные боли.

Источники возникновения: отсутствие возможности организации необходимого количества естественного света ввиду расположения лаборатории на цокольном этаже с небольшим количеством окон.

Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения по СП 52.13330.2016 [41] приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Нормативные показатели освещения помещений общественных, жилых и вспомогательных зданий [41]

Помещения	Плоскость (Г – горизонтальная, В – вертикальная) нормирования освещенности и КЕО, высота плоскости над полом, м	Естественное освещение		Совмещенное освещение	
		КЕО e_n , %		КЕО e_n , %	
		При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении
Лаборатории органической и неорганической химии, термические, физические, спектрографические, фотометрические, микроскопные...	Г – 0,8	3,5	1,2	2,1	0,7
Помещения	Искусственное освещение				
	Освещенность рабочих поверхностей, лк		Объединенный показатель дискомфорта, UGR, не более	Коэффициент пульсации освещенности, %, не более	
	При комбинированном освещении	При общем освещении			
Лаборатории органической и неорганической химии, термические, физические...	500/300	400	21	10	

Общая освещенность при комбинированном освещении должна составлять не менее 300 лк, что чрезвычайно важно при работе с лазерным излучением, так как в хорошо освещенной комнате зрачок глаза сужен, и возможность повредить его лазерным излучением меньше, чем в темном помещении.

2) Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны

Как известно, в исследовательских лабораториях может скапливаться пыль в результате передвижений и разного рода работ. При облучении лазерным излучением полупроводниковых кристаллов, состоящих из металлов и неметаллов, может происходить дополнительное запыление рабочей зоны, так как исследуемые образцы относятся к токсичным веществам. Если дышать пылью с примесями частиц токсичных веществ, это может вызвать заболевания дыхательных путей, глотки, легких, аллергические реакции, раздражение слизистых оболочек глаз.

Согласно ГОСТ 12.1.007–76 ССБТ [42] выделяют 4 класса вредных веществ. В таблице 18 приведены основные показатели и их нормы для данных классов. В исследуемых образцах присутствуют вещества, относящиеся к первому классу опасности «чрезвычайно опасные вещества» (кадмий, мышьяк, теллур) и к третьему классу опасности «умеренно опасные вещества» (пыль, селен).

Таблица 18 – Основные нормированные показатели вредных веществ [42]

Наименование показателя	Нормы для класса опасности	
	1-го	3-го
Предельно допустимая концентрация (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	Менее 0,1	1,1-10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	151-5000
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	501-2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	5001-50000
Коэффициент возможности ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	29-3
Зона острого действия	Менее 6,0	18,1-54,0
Зона хронического действия	Более 10,0	4,9-2,5

3) Повышение уровней шума

В ходе снятия спектрально-кинетических характеристик исследуемых образцов, при воздействии электронным пучком возникает шум от источника накачки лазера или при воздействии лазерным пучком от системы охлаждения неодимового лазера. Повышение уровня шума может приводить к головным

болям, утомляемости, ухудшению работы центральной нервной системы. Однако, воздействие повышенного уровня шума являются кратковременными.

Нормирование воздействия на человека повышенного уровня шума производится согласно ГОСТ 12.1.003-83 [43]. Допустимые звуковые характеристики на рабочем месте приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного уровня звука [43]

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Помещение лаборатории для проведения экспериментальных работ	103	91	83	77	73	70	68	66	64	75

4) Повышение уровней электромагнитных и ионизирующих излучений

Само лазерное излучение и лазерное оборудование являются источником электромагнитного излучения. Источником ионизирующего излучения является дисплей компьютера, на котором производится обработка результатов исследования. Регулярное воздействие электромагнитного и ионизирующего излучения на человека может приводить к ослаблению иммунной системы, повышению утомляемости, раздражительности, головным болям и т.п.

Для обеспечения условий радиационной безопасности устанавливаются контрольные уровни по СанПиН 2.6.1.2523-09 [44]. Основные предельные дозы приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Основные предельные дозы [44]

Нормируемые величины	Предел доз
	Персонал (группы А)
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год

Продолжение таблицы 20

Эквивалентная доза за год в	
Хрусталике глаза	150 мЗв
Коже	500 мЗв
Кистях и стопах	500 мЗв

5) Прямое, зеркально или диффузно отраженное лазерное излучение

При попадании излучения в глаз человека происходят необратимые повреждения сетчатки, роговицы, хрусталика, так как лазерное излучение обладает высокой мощностью. Прямое, а в некоторых случаях и рассеянное лазерное излучение способно вызывать ожоги кожи. Во избежание повреждения органов зрения необходимо применять средства индивидуальной защиты.

Средства защиты работающих устанавливаются по ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ [45]. СИЗ при работе с лазерным излучением:

- Очки защитные
- Халат для защиты от общих производственных загрязнений и механических воздействий
- Фартук из полимерных материалов с нагрудником
- Перчатки
- Средство индивидуальной защиты органов дыхания фильтрующее.

6) Опасность поражения электрическим током вследствие повышенного напряжения в источниках электропитания лазеров

При работе с лазерной установкой опасность представляет повышенное значение напряжения тока в цепи, источниках питания, ток может пройти через тело человека. Результатом замыкания через тело человека могут стать термические ожоги, электролитическое разложение крови, нарушение внутренних биологических процессов.

Согласно ГОСТ 12.1.038-82 [46] ПДУ для переменного тока с частотой 50 Гц составляет напряжение 2 В и сила тока 0,3 мА.

Согласно классификации помещений по опасности поражения электрическим током (ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. [47]) лаборатория относится к поме-

щениям без повышенной опасности. Влажность в помещении не превышает 50%, температура поддерживается на отметке 20⁰, на полу используется токо-непроводящее покрытие (линолеум).

5.2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия

Для безопасной работы по исследованию спектрально-кинетических параметров свечения полупроводниковых кристаллов, инициированных лазерным излучением, необходимо проводить ряд мероприятий и действий, позволяющих минимизировать вредное воздействие факторов на организм человека.

Средствами защиты от воздействия лазерного излучения и продуктов распада образцов являются регулярные уборки помещения, использование вытяжной системы вентиляции с адсорбирующими фильтрами, а также использование перчаток и респираторов [45].

Во избежание повреждений кожных покровов и зрительного аппарата следует использовать индивидуальные средства защиты. К ним относятся: защитные очки, щитки, перчатки, специальная одежда. Также важно убирать волосы во избежание попадания их в оптический тракт лазера. Из коллективных средств защиты используют специальные защитные экраны, поглощающие рабочий диапазон длин волн лазерного излучения, окружают установку матовыми поверхностями, чтобы свести к минимуму отражение.

Для защиты от воздействия повышенного уровня шума при проведении экспериментов необходимо использование средств индивидуальной защиты (наушники). Возможна установка звукопоглощающих экранов, щитов [43]. Основными мероприятиями, направленными на поддержание благоприятного микроклимата на рабочем месте исследователя, являются использование системы кондиционирования воздуха.

Основным мероприятием по защите от воздействия электромагнитного излучения является режим труда и отдыха (после часа работы перерыв 10 минут), применение экранирования частей оборудования [48]).

Технические средства защиты от поражения электрическим током – изоляция токоведущих проводов, заземление для устранения зарядов статического электричества, автоматическое отключение питания [45].

Что касается организационных мероприятий, это проведение вводного инструктажа на рабочем месте ответственным лицом и проверка знаний техники безопасности работников.

5.3. Экологическая безопасность

Основным источником загрязнения окружающей среды являются исследуемые полупроводниковые кристаллы, в состав которых входят токсичные металлы, что негативно сказывается на атмосфере, литосфере и гидросфере. В процессе исследования воздействия лазерного излучения на образцы происходит образование продуктов их разложения, представляющие собой пыль и аэрозоли.

В данной работе используются незначительные по массе образцы, которые хранятся в заводской упаковке или кейсах, что позволяет минимизировать вредное воздействие на окружающую среду.

Продукты распада утилизируются из зоны воздействия излучения при помощи вытяжной вентиляции с адсорбционными фильтрами, позволяющими снизить негативное влияние на атмосферу.

Водные ресурсы не используются для утилизации отходов, используются только для очищения от запыленности в лаборатории.

В таблице 21 приведены значения предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и воде для веществ, используемых в соединениях исследуемых образцов.

Таблица 21 – Предельно-допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосфере и воде [49], [50]

В атмосферном воздухе				
Наименование вещества	Формула	Величина ПДК (мг/м ³)		Класс опасности
		Максимальная разовая	Среднесуточная	

Продолжение таблицы 21

Мышьяк, неорганические соединения	-	-	0,0003	1
В воде водных объектов				
Наименование вещества	Формула	Величина ПДК, мг/л		Класс опасности
Теллур	Te	0,01		2
Кадмий	Cd	0,001		2
Селен	Se	0,01		2
Мышьяк	As	0,01		1

Что касается загрязнения почвы, то его избежать позволяет правильная утилизация используемых для освещения помещения люминесцентных ламп, которые передаются в специализированные пункты переработки ртутьсодержащих отходов по ГОСТ Р 52105-2003 [51].

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Возможными чрезвычайными ситуациями в данной работе могут быть: короткое замыкание электрической цепи, возгорание лазерного оборудования, обрушение конструкции здания, терроризм, угроза пандемии, Наиболее вероятная ЧС при работе с лазерным излучением – возгорание лазерного оборудования, основной причиной которого может стать несоблюдение техники безопасности или неправильная эксплуатация оборудования. Кроме этого, опасность возникновения пожара представляют повреждения изолирующих покрытий, попадание влаги, перегрев оборудования.

Противопожарная защита должна достигаться применением одного из следующих способов или их комбинацией по ГОСТ 12.1.004-91 [52]:

- применением средств пожаротушения и соответствующих видов пожарной техники;
- применением автоматических установок пожарной сигнализации и пожаротушения;
- устройствами, обеспечивающими ограничение распространения пожара;

- применением средств коллективной и индивидуальной защиты людей от опасных факторов пожара и др.

Организационно-технические и эксплуатационные мероприятия включают в себя: регулярное проведение инструктажей по электро- и пожаробезопасности, правильное размещение оборудования, его своевременный осмотр и ремонт в случае признаков неисправности, содержание в исправном состоянии изоляции токоведущих проводов.

В случае непосредственного возгорания следует придерживаться специального порядка действий, таких как:

- Отключение установки от электросети;
- Принять первые меры по тушению пожара при помощи огнетушителей (углекислые);
- Если нейтрализовать очаг возгорания своими силами не удалось, то необходимо эвакуировать сотрудников согласно плану эвакуации, расположенному в лаборатории;
- Вызвать службу пожарной безопасности;
- Во время эвакуации обязательно использование средств защиты органов дыхания: ватно-марлевые повязки, смоченный водой текстильный материал. Следует отметить, что в здании имеется автоматическая звуковая система оповещения о немедленной эвакуации в случае пожароопасности.

Выводы по разделу:

Человеку, занимающемуся какой-либо трудовой деятельностью важно знать последствия, которые данная деятельность может нести в окружающую среду и самому человеку, а также соблюдать необходимые меры безопасности. В процессе написания раздела были изучены организационно-правовые вопросы обеспечения безопасности, выявлены вредные и опасные факторы, влияющие на здоровье человека при работе с лазерным излучением. Описаны меры по сокращению влияния вредных и опасных факторов. Также были рассмотрены меры по предотвращению ЧС в лаборатории и порядок действий при наиболее вероятной чрезвычайной ситуации.

Заключение

1. Обнаружена двухфотонная люминесценция (ДФЛ) кристалла CdSe при возбуждении первой гармоникой Nd-лазера ($\lambda = 1064$ нм). Установлено, что эффект носит пороговый характер и инициируется при достижении плотности энергии лазерного излучения $H \geq 1,2$ Дж/см².

2. Обнаружена множественная филаментация лазерного излучения в кристалле CdSe. Установлено, что при фокусировке лазерного излучения ($\lambda = 1064$ нм) с плотностью энергии $H \geq 1,2$ Дж/см² в приповерхностную область кристалла в объеме образуются тонкие светящиеся нити (филаменты) длина и количество которых зависит от H . При $H \geq 2$ Дж/см² длина филамент достигает 14 мм, а их количество $\sim 5-7$ при диаметре $\sim 50-100$ мкм.

Максимум спектра двухфотонной люминесценции (ДФЛ) кристалла CdSe находится при $\lambda_{\text{макс.}} = 650-670$ нм. В отличие от однофотонной люминесценции двухфотонная люминесценция несёт информацию об объёмных свойствах кристалла.

3. При $H \geq 5$ Дж/см² в приповерхностной области кристалла инициируется оптический пробой с образованием приповерхностной лазерной плазмы (ППП), о чем свидетельствует появление атомных линий Cd в эрозионном спектре лазерного факела.

Также в работе была оценена ее экономическая составляющая (бюджет), опасные и вредные факторы при работе с лазерным излучением и меры защиты от воздействия данных факторов, рассмотрены правовые мероприятия по обеспечению безопасности проводимых исследований.

Список использованных источников

1. Горелик, С.С. Материаловедение полупроводников и диэлектриков / С.С. Горелик, М.Я. Дашевский. – 2. Изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2003.
2. Игнатов А.Н. Оптоэлектроника и нанофотоника: учебное пособие / А.Н. Игнатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: Изд-во Лань, 2017. – 596 с.
3. Полупроводниковые соединения, их получение и свойства / Н.Х. Абрикосов [и др.]. – М.: Наука, 1967. – 176 с.
4. Чопра К. Тонкопленочные солнечные элементы / К. Чопра, С. Дас; пер. с англ. с сокращениями. – М.: Мир, 1986. – 435 с.
5. Маянов Е.П. Рынок монокристаллов GaAs и тенденции развития / Е.П. Маянов, С.Н. Князев, А.В. Наумов // Известия вузов. Материалы электронной техники. - 2016. - № 3. - С.156-162.
6. Черняев В.Н. Технология получения эпитаксиальных слоев арсенида галлия и приборы на их основе / В.Н. Черняев, Л.В. Кожитов. – М.: Энергия, 1974. – С.232.
7. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники: учебник для вузов / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
8. Пека Г.П. Люминесцентные методы контроля параметров полупроводниковых материалов и приборов / Г.П. Пека, В.Ф. Коваленко, В.Н. Куценко. – Киев: Изд-во Техника, 1986. – 152 с.
9. Фотолюминесцентные свойства и коэффициент усиления монокристаллов CdS, CdSe при возбуждении электронным пучком / Л.Н. Борович, А.В. Дуденкова, В.М. Леонов и др. // Квантовая электроника. – 1974. - № 3. - С.653-659.
10. Махний Е.В. Высокотемпературная краевая люминесценция слоев селенида кадмия кубической модификации / Е.В. Махний, М.М. Слетов // Письма в ЖТФ. – 2000. - № 17. – С.71-75.
11. Лебедева Д.А. Деградация фотолюминесценции в полупроводниковых нанокристаллах на основе CdSe / Д.А. Лебедева, А.В. Кацаба, С.А. Амбровевич // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2000. - №6. – С.10-12.

12. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т.1 / Под ред. В.Ю. Баранова. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2005. – 600 с.
13. Аналитическая лазерная спектроскопия: пер. с англ. / К. Сакчи [и др.]; ред. Н. Оменетто, пер. Н. Б. Зоров, ред. пер. Ю. Я. Кузяков. - М.: Мир, 1982. - 606 с.
14. Пиментел Дж. Возможности химии сегодня и завтра / Дж. Пиментел, Дж. Кунрод; пер. с англ. В.А. Силачева и Ю.А. Устынюк, под ред. Ю.Д. Третьякова. - М.: Мир, 1992. – 288 с.
15. О спектре двухфотонного межзонного поглощения лазерного излучения в полупроводнике GaAs / А.З. Грасюк, И.Г. Зубарев, А.Б. Миронов, И.А. Полуэктов // Квантовая электроника. - 1975, - № 8, - С.1826-1828.
16. Шуберт М. Введение в нелинейную оптику / М. Шуберт, Б. Вильгельми; пер. с нем. М.А. Ковнера. – М.: Мир, 1973. – 248 с.
17. Бутиков Е.И. Оптика: Учебное пособие для вузов / Е.И. Бутиков; под ред. Н.И. Калитеевского. – М.: Высшая школа, 1986. – 512 с.
18. Чекалин С.В. От самофокусировки световых пучков – к филаментации лазерных импульсов / С.В. Чекалин, В.П. Кандидов // Успехи физических наук. – 2013. - № 2. – С. 133-150.
19. Влияние влажности воздуха на распространение лазерных импульсов в режиме филаментации / Г.Э. Ризаев, Д.В. Мокроусова, А.В. Шалова и др. // Современные средства диагностики плазмы и их применение: сб. тезисов докладов XI Конференции. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С.80-83.
20. Кузнецов А.В. Множественная филаментация фемтосекундных лазерных импульсов / А.В. Кузнецов, А.С. Кузаков, Е.Ф. Мартынович // Известия РАН. Серия физическая. - 2016. - №1. – с.71-74.
21. Дергачев А.А. Филаментация фемтосекундных ИК и УФ импульсов при фокусировке в воздухе / А.А. Дергачев, А.А. Ионин, В.П. Кандидов и др. // Квантовая электроника. – 2013. - № 1. – С.29-36.
22. Мельникова А.И. Положение глобального фокуса пучка при множественной филаментации фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе /

А.И. Мельникова, О.В. Минина // Труды пятнадцатой всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов: сб. статей. – Томск: Изд-во НТЛ, 2018. – С.316-321.

23. Кандидов В.П. Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения / В.П. Кандидов С.А. Шленов, О.Г. Косарева // Квантовая электроника. - 2009. - № 3, - С.205-228.

24. Исследование явления филаментации фемтосекундного лазерного излучения / М.А. Тарасова, К.С. Хорьков, Д.А. Кочуев, А.В. Иващенко // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2018. - №8. – С.33-40.

25. Динамика структуры области множественной филаментации лазерных импульсов в стекле / Д.В. Апексимов, С.С. Голик, А.А. Землянов и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2016. - №12. – С.1029-1033.

26. Механизмы запасания энергии в кристаллах фторида лития под действием фемтосекундных лазерных импульсов / В.П. Дресвянский, М.А. Моисеева, Д.С. Глазунов и др. // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2. – С.2829-2834.

27. Высоконелинейные фундаментальные механизмы возбуждения и окрашивания широкозонных кристаллов интенсивным фемтосекундными лазерными импульсами / Е.Ф. Мартынович, Д.С. Глазунов, А.А. Григорова и др. // Оптика и спектроскопия. – 2008. - № 3. – С.380-384.

28. Кузнецов А.В. Пространственное распределение центров окраски, создаваемых в LiF под действием фемтосекундных лазерных импульсов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук (01.04.21) / Кузнецов Андрей Викторович. – Новосибирск, 2011. – 18 с.

29. Транспортировка СВЧ излучения в плазменных волноводах скользящих мод / В.Д. Зворыкин, А.О. Левченко, Н.Н. Устиновский, И.В. Сметанин // Письма в ЖЭТФ. - 2010. - №5. - С.244-248.

30. Идентификация газовой фазы по электронно-колебательным спектрам люминесценции молекул, возбуждаемых объемным разрядом, индуцированным сильноточным электронным пучком: методические указания к лабора-

торной работе по дисциплине методы спектрального анализа / кафедра лазерной и световой техники НИ ТПУ. – Томск, 2014. – 13 с.

31. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

32. Экономика предприятия нефтегазового комплекса. Практикум: учебное пособие / А.В. Аношкина; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 119 с.

33. Трудовой Кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) // Собрание законодательства РФ. - 2001- №1. – Ст.3.

34. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» от 09.12.2011 N 878 (с изм. на 28.05.2019). – М.: АО Кодекс. - 2011. – 108 с.

35. ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. – Введ. 01.01.1979. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 9 с.

36. ГОСТ 12.2.033-78. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования. – Введ. 01.01.1979. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 9 с.

37. ГОСТ 2269-76. Рабочее место оператора. Взаимное расположение элементов рабочего места. – Введ. 01.01.1978. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 4 с.

38. ГОСТ 21889-76. Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования. – Введ. 01.07.1977. – М.: Изд-во стандартов, 1993. – 16 с.

39. ГОСТ 12.2.049-80. Оборудование производственное. Общие эргономические требования. – Введ. 01.01.1982. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. - С.74-88.

40. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ. 01.01.2017. - М.: Стандартинформ, 2016. – 10 с.
41. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*. – Введ. 08.05.2017. – М.: АО Кодекс, 2016. – 102 с.
42. ГОСТ 12.1.007-76 ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 01.01.1977. – М.: Стандартинформ, 2007. – 8 с.
43. ГОСТ 12.1.003-83. Шум. Общие требования безопасности. - Введ. 01.07.1984. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 13 с.
44. СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – Введ. 07.07.2009. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
45. ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация. - Введ. 01.07.1990. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 8 с.
46. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. - Введ. 01.07.1983. - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.
47. ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. - Введ. 01.01.2019. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.
48. СанПиН 2.2.4.1191-03. Электромагнитные поля в производственных условиях. - Введ. 01.05.2003 (с изм. на 02.03 2009). -М.: Минздрав России, 2003. – 39 с.
49. ГН 2.1.6.3492 – 17. Предельно-допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. - Введ. 22.12.

2017 (с изм. на 31.05.2018). – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. – 55 с.

50. ГН 2.1.5.1315 – 03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. - Введ. 30.04.2003. – М.: Минздрав России, 2003. – 152 с.

51. ГОСТ Р 52105 – 2003. Классификация и методы переработки ртуть-содержащих отходов: Ресурсосбережение. Обращение с отходами. - Введ. 01.07.2004. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 11 с.

52. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. – Введ. 01.07. 1992. – М.: Стандартиформ, 2006. – 68 с.